

固有ビーム分割多重方式の実現に関する研究 (031201001)

Studies on Eigenbeam Space Division Multiplexing

小川恭孝 北海道大学大学院情報科学研究科

Yasutaka Ogawa, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

大鐘武雄[†] 西村寿彦[†]

Takeo Ohgane[†] Toshihiko Nishimura[†]

[†]北海道大学大学院情報科学研究科

[†]Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

研究期間 平成 15 年度～平成 16 年度

概要

MIMO システムを RF チャネルシミュレータにより模擬するシステムを整備した。また、固有ビームを送信するための MIMO チャネル推定用に、端末からの上り回線として、MIMO 空間分割多重パケットも時分割により伝送可能なシステム構成とした。その上で、固有ビーム分割多重方式の室内実験を行い、(1) 端末からの ACK パケットにより基地局側で MIMO チャネルを推定できること、(2) MIMO チャネル情報に基づき固有ビームを簡易に形成できること、(3) ビーム数に合わせて送信電力制御が簡易にできること、(4) データパケットの端末受信時に、MMSE に基づく空間フィルタリングでストリーム分離ができることを確認した。

Abstract

An experimental MIMO system using RF channel simulators has been developed. The system is configured to have a TDD frame structure for MIMO channel estimation using spatially-multiplexed ACK packets from a terminal. The measurement results show that (1) channel estimation, (2) eigenbeam calculation, (3) transmit power and bit assignment, and (4) signal demultiplexing operate correctly.

はじめに

送受信機に複数のアンテナを設置する MIMO システムはチャネル容量を大きく改善する手法として期待され、一般に情報量が大きいと言われる下り回線での適用が検討されている。MIMO チャネルの特異値解析によって得られる固有ベクトルを用いて、送信側でビーム形成し、各ビームに独立な情報を伝送する固有ビーム分割多重方式は、受信側でも単にマルチビーム形成を行うだけで分離検出ができ、処理が簡単となる。さらに、チャネル容量の面でも最適な送受信系となり、チャネル容量は大きく改善される。しかし、固有ビーム分割多重方式は、送信側で MIMO チャネル情報を取得するだけでなく、特異値解析による処理を送信側あるいは受信側で行う必要がある。

本研究の目的は、優れた利点を有する固有ビーム分割多重方式の装置化および室内実験を通して、実装の問題点の解決を図るとともに、その実現性を明らかにすることを目的としている。

開発装置の概要と測定結果

・TDD フレーム構成

E-SDM 方式では、固有ビーム送信を行う側で MIMO チャネル情報を知る必要がある。ここでは時分割多重方式 (TDD) を考慮し、送信側で MIMO チャネル情報を推定する手法を考える。ただし、MIMO チャネル情報を得るために、少なくともパイロット信号部分は受信側からも MIMO 伝送を行う必要がある。ここでは、受信側からの受信確認 (ACK) パケットの先頭に 8 ビットのアダマール符号によるパイロット信号を挿入し、通常の空間多重伝送を行うものとした。

基地局からのデータパケットは、(1) 8 ビットのアダマール符号によるパイロット信号 (BPSK 変調)、(2) 変調多値数やサブストリーム数を表す情報 (BPSK 変調 8 ビット・1 ストリーム送信)、(3) 他の制御用として予約されたスロット (16 シンボル・現在は未使用)、(4) 48 シンボルのデータ (変調方式可変)、という構成とした。

シンボル長は $5\mu\text{sec}$ としたためデータパケット長は 0.4ms となる。この間のフェージング変動の影響が無視できる (準静的フェージング環境) よう、実験の際に設定する最大ドップラー周波数は 10Hz までとした。フレーム長は約 20ms と設定した。これは、TDD フレーム構成を持つ無線 LAN 規格である HIPERLAN/2 のフレーム長 2ms の約 10 倍に当たる。したがって、HIPERLAN/2 の場合に置き換えると、 100Hz までの最大ドップラー周波数が観測可能である。なお、上り回線の ACK パケットで MIMO チャネル情報を推定してから下り回線で E-SDM 送信を行うまでのタイムラグは、約 16ms とした。

・フェージング変動による送信ビーム劣化とその補償法

端末からのフィードバック情報によるチャネル推定、および、TDD における ACK パケットによる推定のどちらの手法においても、チャネル情報を取得してから MIMO 伝送を開始するまでにタイムラグが発生する。この間にチャネルの変動が大きければ、結果としてチャネル情報に誤差が生じてしまう。そのような場合、チャネル情報を用いる E-SDM 方式の特性も劣化する。ここでは、送信直前のチャネル情報、および、その一つ前のチャネル情報から、送信時のチャネルを一次外挿により推定する手法を用い、タイムラグにより発生するチャネル情報誤差の影響を低減する。また、受信側では ZF アルゴリズムによる空間フィルタリングを行うことで受信ビームを形成する。

・ストリーム数と送信電力の簡易制御

E-SDM では送信側でチャンネル推定後、そのチャンネルに応じてストリーム数、および、その送信電力を決定することで最適な通信容量を実現する。これを行うには、受信側での SNR とチャンネル応答行列から得られる固有値をもとに注水定理を用いて決定するのが一般的である。しかし、これらの計算の負荷は非常に大きいため、DSP に実装する場合の問題となる。そこで、本研究では送信側で得られる固有値のみを用いてストリーム数とそれに応じた送信電力計算の簡略化法を求め、新たに導入した。

・ソフトウェア送受信機と MIMO チャンネルシミュレータの構築

次に、今回整備した実験系について示す。実験系は、(1) ソフトウェア送受信機 2 組と、(2) MIMO チャンネルシミュレータに大別される。ソフトウェア送受信機は PCI ボード上に最大 4 つまでのモジュールを組み込むことができる HUNT Engineering 社の DSP システムを導入した。これに浮動小数点演算型 DSP TI320C6701 を 2 個、分解能 12 bit の A/D 変換器 (12 ch) を 1 個、分解能 14 bit の D/A 変換器 (8 ch) を 1 個搭載したボードを基地局用、端末用にそれぞれ用意した。送受信信号は I-ch および Q-ch のベースバンド信号として入出力するものとし、基地局で送受信アンテナ 3 素子 (ベースバンド信号各 6 ch)、端末で送受信アンテナ 2 素子 (ベースバンド信号各 4 ch) の MIMO 構成とした。A/D、および、D/A のサンプリング周波数は、200 kHz (サンプリング間隔 5 μ sec) とした。

以上のソフトウェア送受信機は、基地局側が 3 素子、端末局側が 2 素子のアンテナ (入出力ポート) を備えている。したがって、MIMO 伝送実験を行うためには、 $3 \times 2 = 6$ パスが必要となる。本研究では TDD 回線を想定しているため、上下回線は同じパスを経由する。そこで、実験では 2 ch のチャンネルシミュレータを 3 台使い、基地局と端末の送信出力、および、受信入力、それぞれチャンネルシミュレータの入出力ポートで合成・分配することで実現した。

・室内実験系による測定結果

図 1(a)(b)に室内 MIMO 伝送実験における誤り率測定結果を示す。それぞれ基地局側のアンテナが 2 素子の場合と 3 素子の場合である。端末側はどちらも 2 素子である。横軸は、1 素子オムニアンテナで送信したときに受信側で E_s/N_0 が 0 dB となる送信電力で規格化した総送信電力である。実線はチャンネルの一次外挿を行わなかった場合で、点線は行った場合を示す。また、最大ドップラー周波数が 4Hz、10Hz の結果にはそれぞれ Δ 、 \circ のマーカーを付している。

図からわかるように、チャンネルの外挿の効果は非常に優れており、基地局側の素子数に関わらず、最大ドップラー周波数が 4 Hz の場合では、誤り率にフロアが観測されなくなった。これは、前述した HIPERLAN/2 規格において、最大ドップラー周波数 40 Hz に対応しており、搬送波周波数 5 GHz において時速約 9 km 程度までは、大きな改善効果が得られることを実験的に示すものである。

まとめ

ソフトウェア送受信機を用いて、E-SDM 伝送実験系を構築した。MIMO チャンネルの形成には、RF チャンネルシミュレータを 3 台使用し、基地局 3 素子・端末 2 素子の MIMO 環境を実現した。E-SDM 方式では、送信ビームの形成後、受信品質を推定してサブストリーム数・送信電力の制御を行わなければならない。ここでは処理の簡略化のため、各固有チャンネルの固有値比でサブストリーム数・送信電力制御を行う手法を提案した。また、チャンネル推定から固有ビーム送信までのタイムラグにより、チャンネルの直交度が劣化することを補償するため、連続した二つの ACK パケットを用いて送信時のチャンネルを予測する手法も適用した。以上のシステムを用いた伝送実験により、E-SDM 伝送が動的フェージング環境でも正常に動作すること、また、フェージング変動補償を行うことで、歩行速度程度では特性劣化をほぼ抑えられることが明らかとなった。

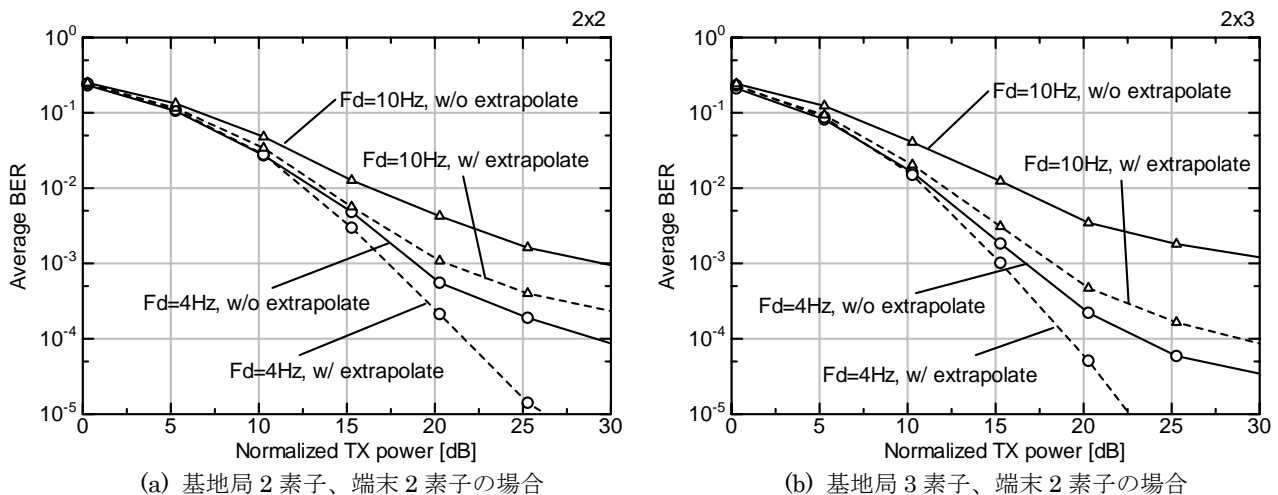


図 1 室内実験による E-SDM 方式の誤り率特性の測定結果

誌上発表リスト

- [1]西本浩, 小川恭孝, 西村寿彦, 大鐘武雄, “屋内伝搬実験に基づく 2x2 MIMO-SDM の特性評価,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-B, No. 9, pp. 1442-1453 (Sept. 2004) 被引用度数: データが公表されていません
- [2]堤貴彦, 西村寿彦, 大鐘武雄, 小川恭孝, “各種空間分割多重方式におけるチャンネル情報誤差の影響に関する検討,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-B, No. 9, pp. 1496-1504 (Sept. 2004) 被引用度数: データが公表されていません